第 11 期
2015 年 11 月

电 子 学 报
ACTA ELECTRONICA SINICA

Vol.43 No.11
Nov. 2015

利用浮标和 NWP 风场对 HY-2 散射计联合定标验证

朱金台[1,2],董晓龙[2],云日升[2]

(1.航天东方红卫星有限公司,北京 100094;2.中国科学院空间科学与应用研究中心,中国科学院微波遥感重点实验室,北京 100190)

摘 要: 本文对海洋二号卫星微波散射计(Haiyang-2 Scatterometer,HY-2 SCAT)进行了海洋定标算法研究,并使用数值天气预报模型风场(Numerical Weather Prediction,NWP)和浮标数据对定标后反演风场进行联合验证.通过匹配 2012 年 12 月份的 HY-2 SCAT 反演风场、NWP 风场及浮标的观测数据,共得到无降雨条件下的 3112 个 25km 分辨率的匹配数据.对匹配数据进行分析时,采用基于变量的误差分析方法能够得到比传统线性回归方法更精确的验证结果.选取在风场 U、V 分量进行联合验证能得到较在风速、风向上更为有利的验证结果.验证结果表明,经过海洋定标法之后的 HY-2 SCAT 测量后向散射系数的误差残余小于 0.15dB,其反演风场与浮标及 NWP 数据相吻合,U、V 分量相对浮标及 NWP 数据偏差均小于 0.23m/s,验证了该定标算法的有效性及定标后反演风场的高精度.

关键词: 海洋二号卫星;微波散射计;定标验证;海面风场

中图分类号: TP732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)11-2237-06

电子学报 URL: http://www.ejournal.org.cn **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.015

Calibration and Validation of HY-2 Scatterometer Using NWP and Buoy Data

ZHU Jin-tai[1,2],DONG Xiao-long[2],YUN Ri-sheng[2]

(1.*DFH Satellite Company Limited*,*Beijing* 100094,*China*;
2.*The CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing*,*National Space Science Center*,
Chinese Academy of Sciences,*Beijing* 100190,*China*)

Abstract: The scatterometer onboard HY-2 satellite is calibrated using Numerical Ocean Calibration and its retrieval winds after calibration are validated from 130 global buoys and winds from the European Centre for Medium-Range Weather Foresting Numerical Weather Prediction model using triple-collocation during December 2012,resulting in 3112 collocated triplets.The KNMI QC flag is used to collocate the data without rain efforts.It is found that functional relationship employing the error-in-variables method is more accuracy than that using linear regression for the validation of retrieval wind from HY-2 scatterometer.Moreover, using the wind component domain is confirmed to be favourable.It is shown that the uncertainties after ocean calibration is less than 0.15dB,resulting in 0.2m/s systematic wind effects.For both zonal and meridional winds,the similar wind fields comparing with buoys and ECMWF indicate that the effective of the calibration and high quality of the retrieval winds.

Key words: HY-2 satellite;scatterometer;calibration and validation,wind field

1 引言

2011 年 8 月 16 日成功发射的海洋二号卫星(Haiyang-2,HY-2)是中国第一颗海洋动力环境卫星,其搭载的微波散射计(HY-2 Scatterometer,HY-2 SCAT)采用 Ku 波段(13.256 GHz)笔形波束旋转扫描体制.该体制散射计具有较大的观测刈幅,且星下点无遗漏.HY-2 SCAT 采用 1m 圆盘反射面天线提供 VV 极化(外波束)和 HH 极化(内波束)两个笔形波束分别以固定入射角(48°和 41°)对地球表面目标进行 4 次测量,分别记为内波束前视、内波束后视、外波束前视和外波束后视.内外波束对应的观测刈幅分别为 1350 km 和 1750 km,使得 HY-2 SCAT 每天能够覆盖 90%的海洋表面[1].

为了达到 HY-2 SCAT 设计的 ±2m/s 风速精度和 ±20°风向精度的风产品精度要求,对 HY-2 SCAT 进行在轨定标及对定标后反演风场进行真实性检验是 HY-2 SCAT 业务化运行的重要过程.星载微波散射计常用地面扩展目标和地面定标设备对其进行在轨外定标[2,3].为了提高定标精度,Stoffelen 为 ASCAT 开发了利用全球海面风场定标方法[4].对于 HY-2 SCAT,海洋定标法

收稿日期:2014-04-08;修回日期:2014-09-30;责任编辑:马兰英

基金项目:国家自然科学基金(No.41006109,No.41206167)

(Numerical Ocean Calibration, NOC)不仅能够提供高精度的绝对定标且能够消除转动过程中的方位向测量偏差.为了有效评估对 HY-2 SCAT 定标效果,需要对定标后的反演风场进行绝对定标验证.在此之前,已经有多种方法对散射计反演风场进行定标验证.对于 QuikSCAT, Ebuchi[5]、Bourassa[6]和 Katheesan[7]等人分别采用浮标数据和调查船测量数据对 QuikSCAT 反演风场进行评估和验证;Verspeek[8]和 Bentamy[9]利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)风场数据、浮标数据以及 QuikSCAT 反演风场分别对 ASCAT 风场进行验证. Thomas Mathew 等人利用 Jason 高度计风场反演数据与 OSCAT 风场数据进行对比的方法对 OSCAT 风场进行验证[10];WANG He 等人利用浮标、调查船以及石油平台测风计等现场观测数据对 HY-2 SCAT 反演风场进行了真实性检验[11].以上验证方法把诸如浮标、调查船等现场观测风场当做真值,利用传统线性回归(Linear Regression, LR)并计算风场偏差、标准差等手段对散射计反演风场进行评估,该方法忽略了现场观测数据本身的误差以及散射计反演风场与现场观测之间因时间和空间分辨率不一致带来的相对偏差,因此利用以上方法对散射计反演风场进行绝对验证的时候会额外引入一定量的偏差.为了解决在对散射计反演风场验证时,基于地球物理模型(Geophysical Model Function, GMF)的散射计反演风场与现场风场测量误差之间的不一致性问题, Stoffelen 开发了利用散射计反演风场、NWP 模型风场以及浮标观测风场数据联合验证方法对散射计反演风场进行真实性检验,该方法已经成功应用到 ERA-40 有效波高及 OSCAT 反演风场的验证中[12~14].本文采用基于变量的相关误差分析方法(Functional Relationship, FR),利用 HY-2 SCAT 风场反演数据、ECMWF 模型风场以及全球浮标数据对经过 NOC 定标之后的 HY-2 SCAT 反演风场进行联合验证,通过估计误差变量和定标系数实现对 HY-2 SCAT 定标效果的验证和风场反演的真实性检验.

2 HY-2 SCAT 定标及验证方法

2.1 HY-2 SCAT 海洋定标法

海洋定标法通过收集 NWP 的风场信息,进而通过 GMF 仿真海面的后向散射系数(σ^0),并与 HY-2 SCAT 实际测量的 σ^0 进行对比实现对 HY-2 SCAT 的在轨定标[15]. NOC 是基于大量数据的傅里叶分析估计其对应傅里叶系数并与 GMF 进行对比, Ku 波段的 GMF 模型(NSCAT-3)对应的海面后向散射系数 σ^0 是观测入射角 θ、风速 v 及相对风向 ϕ 的函数,可以表示为:

$$\sigma^0(\theta,v,\phi) = B_0(\theta,v)(1 + B_1(\theta,v)\cos(\phi) + B_2(\theta,v)\cos(2\phi)) \quad (1)$$

其中 θ 为观测入射角, v 表示风速, ϕ 为相对风向. σ^0 的均值主要取决于 B_0,受 B_1 和 B_2 的影响较小.对于 HY-2 SCAT,风单元(Wind Vector Cell, WVC)对应的内、外波束对应的入射角近似为一常量.因此式(1)可以表示为傅里叶展开式形式为:

$$\sigma^0(v,\phi) = \frac{1}{2}a_0(v) + a_1(v)\cos(\phi) + a_2(v)\cos(2\phi) \quad (2)$$

其中 $a_0 = 2B_0, a_1 = B_0B_1, a_2 = B_0B_2$,可以表示为:

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\sigma^0(v,\phi)\cos(n\phi)\mathrm{d}\phi,\ n = 0,1,2 \quad (3)$$

利用 NOC 对 HY-2 SCAT 进行在轨外定标只需收集数天 HY-2 SCAT 和 ECMWF 风场数据,然后利用式(2)估计出其傅里叶系数 a_0(即 $2B_0$)即可得到 HY-2 SCAT 和 ECMWF 风场模拟 σ^0 之间的偏差,即:

$$\Delta\sigma^0 = \frac{1}{2}a_0^{\mathrm{SCAT}} - \frac{1}{2}a_0^{\mathrm{NWP}} = B_0^{\mathrm{SCAT}} - B_0^{\mathrm{NWP}} \quad (4)$$

把 HY-2 SCAT 测量得到的 σ^0 减去 $\Delta\sigma^0$ 即可完成对 HY-2 SCAT 的海洋定标.

2.2 HY-2 SCAT 联合验证法

为了评估定标效果及 HY-2 SCAT 反演风场质量,需要对 HY-2 SCAT 进行真实性检验.假设收集得到 N 个匹配风场测量值分别为(x_i,y_i,z_i), $i=1,\cdots,N$,其对应的风场真值为 T_i, $i=1,\cdots,N$.则其测量值可以表示为:

$$\begin{aligned} x_i &= X_i + e_{xi} = T_i + e_{xi} \\ y_i &= Y_i + e_{yi} = a_1 + b_1T_i + e_{yi} \\ z_i &= Z_i + e_{zi} = a_2 + b_2T_i + e_{zi} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 X_i, Y_i, Z_i 表示风场真值 T_i 的线性相关项, e_{xi}, e_{yi}, e_{zi} 表示均值为 0 的随机误差项,且独立于 T_i. $a_n, b_n, n=1,2$,分别表示测量值相对参考系统定标系数的一阶系数和偏差.通常认为浮标数据相对星载散射计和 NWP 数据更为精确,因此定义 x, y, z 分别表示浮标、HY-2 SCAT 和 ECMWF 的风场信息.由于浮标和 HY-2 SCAT 的空间和时间分辨率均较 ECMWF 小很多,因此浮标和 HY-2 SCAT 包含的风场信息比 ECMWF 更为丰富. Vogelzang 研究表明浮标和散射计的观测误差可以假设为相关项且独立于 NWP 风场即 $\langle e_xe_y\rangle = r^2$, $\langle e_xe_z\rangle = \langle e_ye_z\rangle = 0$ 其中 $\langle\cdot\rangle$ 表示均值,这里相关系数 $r^2 = 1.0\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2$[16].这里 r^2 并不是浮标和 HY-2 SCAT 本身的测量误差,而是由于其测量数据与 NWP 数据对应时因时间和空间分辨率不同引入的误差.

通过以上假设,式(5)中未知系数 a_1, b_1, a_2, b_2 可以通过以下计算得出[16]

$$
\begin{aligned}
a_1 &= \langle y \rangle - b_1 \langle x \rangle \\
a_2 &= \langle z \rangle - b_2 \langle x \rangle \\
b_1 &= \langle y^* z^* \rangle / \langle x^* z^* \rangle \\
b_2 &= (\langle y^* z^* \rangle \langle x^* z^* \rangle) / (\langle x^* y^* \rangle \langle x^* z^* \rangle \\
&\quad - (\langle e_x e_y \rangle \langle y^* z^* \rangle))
\end{aligned} \tag{6}
$$

其中 x^*, y^* 和 z^* 分别表示对应项与其均值之差,式(5)中零均值误差项 e_x, e_y, e_z的方差可以表示为:

$$
\begin{aligned}
\mathrm{var}(e_x) &= \langle (x^*)^2 \rangle - \langle y^* z^* \rangle / (b_1 b_2) \\
\mathrm{var}(e_y) &= \langle (y^*)^2 \rangle / b_1^2 - \langle y^* z^* \rangle / (b_1 b_2) \\
\mathrm{var}(e_z) &= \langle (z^*)^2 \rangle / b_2^2 - \langle y^* z^* \rangle / (b_1 b_2)
\end{aligned} \tag{7}
$$

为了对比 Y 和 Z,可以把 Y 和 Z 表示成类似式(5)即:

$$
Y = a_3 + b_3 Z \tag{8}
$$

对比式(8)和式(5)可得系数 a_3和 b_3分别为:

$$
\begin{aligned}
a_3 &= a_1 - a_2 b_1 / b_2 \\
b_3 &= b_1 / b_2
\end{aligned} \tag{9}
$$

3　测量数据

3.1　HY-2 SCAT 数据

HY-2 SCAT 的测量数据为国家卫星海洋应用中心提供的 2012 年 12 月 1-31 日未经定标的 Level-2A (L2A) 数据,WVC 空间分辨率为 25km × 25km.本文利用最大似然法结合 NSCAT-3 模型对 HY-2 SCAT L2A 数据进行风场反演,生成包含海洋风场的 L2B 数据,反演过程中采用多解方案(MSS,选择 144 个解作为风场反演模糊解而不是传统的 4 个模糊解)结合二维变分法(2DVAR)得到 HY-2 SCAT 反演风场,该方法能够获得比传统方法更为精确的反演风场.雨衰是影响散射计风场测量精度的一个重要因素,尤其对 Ku 波段微波散射计,为了得到高精度反演风场用于定标验证过程,在对 HY-2 SCAT 风场反演过程中采用 KNMI 提供的降雨标记算法标记并剔除降雨区域数据.

HY-2 SCAT 刈幅远端的风单元(对应 WVC 编号 1-8,69-76)只被 VV 极化前、后视各观测一次,因此该区域的反演风场质量相对较差,不用来进行定标结果验证和对比.

3.2　预报模型数据

用于定标和验证时的 NWP 数据选取 ECMWF 发布的空间分辨率约为 0.55° × 0.55°的预报风场.ECMWF 预报数据为 UTC 00,UTC 03,UTC 06,UCT 09,UTC 12,UTC 15 和 UTC 18 每 3 小时提供一次的预报数据.把 ECMWF 提供的 NWP 风场 U 分量和 V 分量的风场经过插值处理转化成 25km 空间分辨率的风场.通过 NSCAT-3 得到的 HY-2 SCAT 反演风场为海平面 10 米处的等效风场,利用 LKB 模型把 ECMWF 风场转换到海平面 10m 处等效风场[17].

3.3　浮标数据

利用浮标数据对 HY-2 SCAT 反演结果进行验证时,匹配收集了约 130 个全球浮标其位置分布如图 1 所示.这些浮标均远离海岸线 50km 以上,其测量数据均通过 ECMWF 质量控制,保证了浮标测量数据的有效性.由于 HY-2 SCAT 的 WVC 分辨率为 25km,在浮标数据进行收集和与 HY-2 SCAT 测量数据进行匹配时,选取浮标位置与 HY-2 SCAT WVC 中心距离小于 17.7km($25/\sqrt{2}$)、测量时间差小于 30 分钟的浮标测量数据进行匹配,共得到 3112 个匹配浮标数据.通过 LKB 模型把浮标数据转化为海平面 10m 处等效风场.

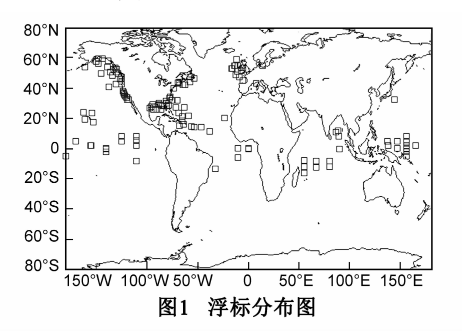


图1　浮标分布图

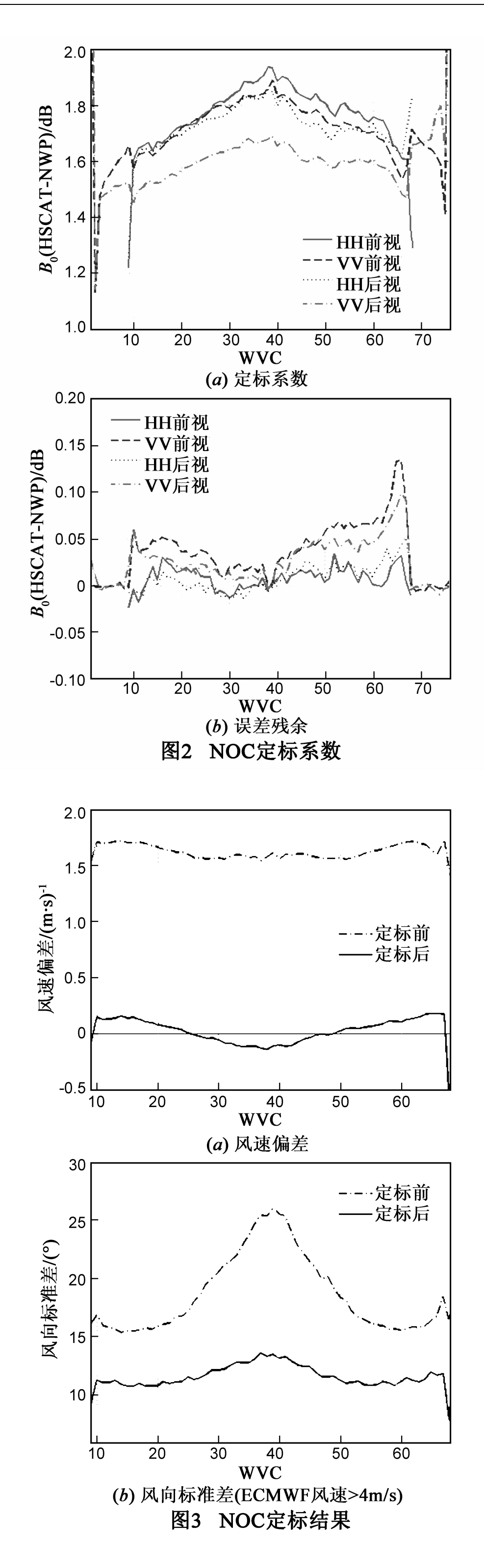
4　HY-2 SCAT 定标及验证结果

4.1　HY-2 SCAT 定标结果

本文对 HY-2 SCAT 进行定标和验证时,选取均被 HH 极化和 VV 极化观测到的 WVC,即对应 WVC 编号为 9-68,则每个 WVC 分别被 HH 极化和 VV 极化前视和后视共观测 4 次.选取 2012 年 12 月 1-7 日 HY-2 SCAT 剔除降雨后的 σ^0测量数据估计 HY-2 SCAT 定标系数,由式(4)共得到 4 个定标系数,如图 2(a)所示.从图中可以看出,HY-2 SCAT 测量的 σ^0比 ECMWF 风场通过 GMF 模型仿真得到的 σ^0高约 1.7dB.把该定标系数补偿到 2012 年 12 月 HY-2 SCAT 测量数据中,得到经过 NOC 定标后的 HY-2 SCAT 测量数据,并对定标后数据进行反演,定标后的误差残余如图 2(b)所示,反演结果如图 3 所示.从图 2 和图 3 中可以看出经过 NOC 之后误差残余为 0 ~ 0.15dB,带来的风速偏差为 0 ~ 0.2m/s,经过 NOC 之后的风向标准差小于 15°.由于星下点附近对应 WVC 的测量方位角比较接近,因此其对应 WVC 的风向精度差于其他 WVC.

4.2　HY-2 SCAT 验证结果

4.1 节给出了 HY-2 SCAT 测量数据 NOC 定标结果,可以看出经过 NOC 之后 HY-2 SCAT 风场反演得到了明显改善.为了对 NOC 之后的反演风场进行绝对评价,利用浮标、ECMWF 联合对 HY-2 SCAT 反演风场进行验证.



(*a*) 定标系数

(*b*) 误差残余

图2 NOC定标系数

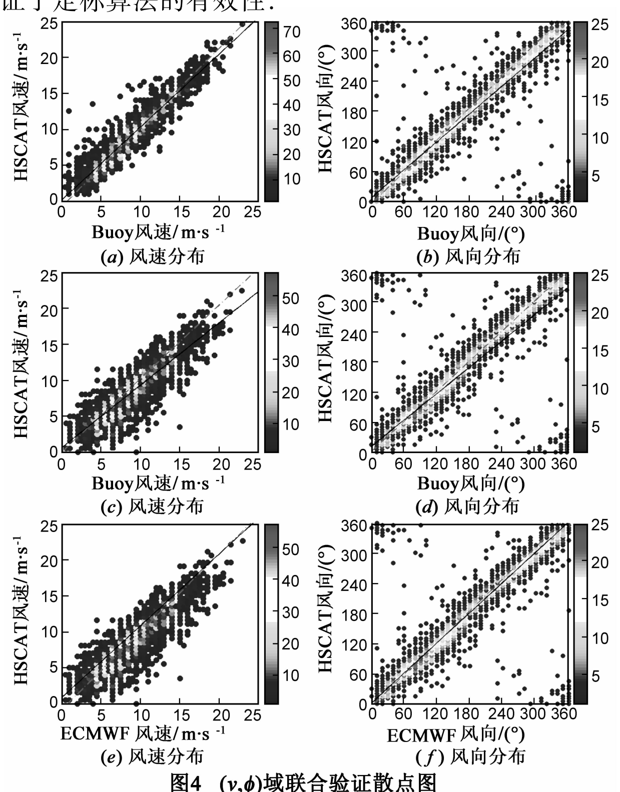
(*a*) 风速偏差

(*b*) 风向标准差(ECMWF风速>4m/s)

图3 NOC定标结果

风场验证的精确度受验证参量选取的影响,风场 U、V 分量域(U, V)的概率分布近似为对称高斯分布,对应误差分布在 U、V 域比较相似且独立于风速;而风速-风向域(v, ϕ)分布中,风向的随机误差分布受风速的影响,尤其是在低风速条件下,且由于风速均为正值因此其误差也非对称分布[12].为了对比不同情况,这里在风速-风向域(v, ϕ)和风场 U、V 分量域(U, V)分别进行验证.

(v, ϕ)域和(U, V)域验证结果分别如图 4 和图 5 所示.图中虚线表示利用 3.2 节基于变量的误差分析方法(FR)得到的定标直线,从图中可以看出收集风场数据对称分布于定标直线两侧.为了对比传统线性回归方法(LR),把 LR 得到的定标直线如图 4 和图 5 中直线所示.对比图 4 和图 5 可以看出,相对于(U, V)域,在(v, ϕ)域 FR 和 LR 得到的定标直线相对偏差较大,主要是由于(v, ϕ)域中的随机误差大于(U, V)域.定标验证系数如表 1 所示,从表 1 中也可以看出在(v, ϕ)域 FR 和 LR 得到定标验证系数差别较明显,而在(U, V)域则有相对稳定的一致性,这同样说明了在(v, ϕ)域随机误差较大.因此在(U, V)域分别对浮标、HY-2 SCAT 和 ECMWF 风场数据的随机误差标准差及其对应风场的标准差进行统计,结果如表 2 所示.从表 2 中可以看出浮标观测数据的随机误差的标准差最大,ECMWF 风场数据的随机误差标准差最小,这与浮标、HY-2 SCAT 以及 ECMWF 空间分辨率紧密相关.三者测量数据的近似一致的标准差和近似一致的相关系数表明 HY-2 SCAT 经过 NOC 之后的反演风场、浮标测量风场以及 ECMWF 预报风场之间的一致性,其中相对浮标和 ECMWF 风场数据,HY-2 SCAT 风场 U、V 分量偏差均小于 0.23m/s,验证了定标算法的有效性.



(*a*) 风速分布 (*b*) 风向分布

(*c*) 风速分布 (*d*) 风向分布

(*e*) 风速分布 (*f*) 风向分布

图4 (v,ϕ)域联合验证散点图

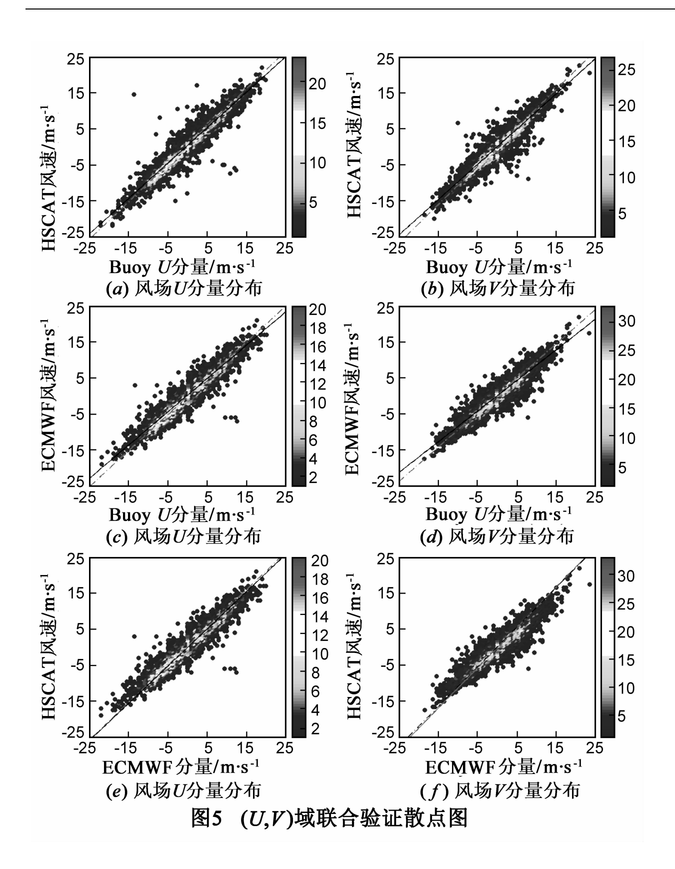


图5　(*U*,*V*)域联合验证散点图

表 1　(v, ϕ)域及(U, V)域用基于变量的误差分析方法(FR)和线性回归(LR)分别得到的定标系数，X, Y, Z 分别对应浮标、HY-2 SCAT 和 ECMWF 风场数据

	定标系数	$Y = a + bX$		$Z = a + bX$		$Y = a + bZ$	
		FR	LR	FR	LR	FR	LR
风速/(m/s)	a	-0.88	0.06	0.00	0.62	-0.88	0.79
	b	1.10	1.01	1.02	0.87	1.08	0.99
风向/(°)	a	-5.95	6.28	0.00	10.33	-5.95	0.56
	b	1.06	0.93	1.01	0.88	1.06	1.00
U 分量/(m/s)	a	0.23	0.21	0.00	0.33	0.23	-0.13
	b	1.05	0.95	1.00	0.92	1.04	1.03
V 分量/(m/s)	a	-0.15	-0.11	0.00	-0.10	-0.15	0.01
	b	1.07	0.98	0.95	0.85	1.12	1.10

表 2　(U, V)域用基于变量的误差分析方法(FR)得到的随机误差 e_x, e_y, e_z的标准差以及观测值 X, Y, Z 标准差结果

	误差标准差/(m/s)			测量标准差/(m/s)			相关系数		
	e_x	e_y	e_z	X	Y	Z	R_{XY}	R_{XZ}	R_{YZ}
U	2.05	1.47	0.66	7.31	7.65	7.33	0.98	0.98	0.98
V	2.06	1.27	0.76	6.24	6.43	5.67	0.97	0.97	0.97

5　结论

本文基于 HY-2 SCAT 测量数据和 ECMWF NWP 等效风场数据结合 NSCAT-3 模型对 HY-2 SCAT 进行海洋定标. 利用 2012 年 12 月 1-7 日 HY-2 SCAT 测量数据得到 HY-2 SCAT NOC 定标系数，并把其校正到 2012 年 12 月测量 σ^0数据中. 相比 ECMWF 预报数据，经过 NOC 之后的 HY-2 SCAT σ^0误差残余为 0 ~ 0.15dB，带来的风速偏差小于 0.2m/s，且关于星下点左右对称；经 NOC 之后的风向标准差小于 15°，风向精度关于星下点左右对称且星下点对应 WVC 风向精度较刈幅其他位置差，这主要是由于星下点 VV 极化和 HH 极化观测方位角比较接近，导致反演时风向精度较差.

为了绝对评价 HY-2 SCAT 的 NOC 定标效果，采用浮标和 ECMWF 预报风场对 HY-2 SCAT 反演风场联合验证. 利用 NSCAT-3 模型对 HY-2 SCAT 定标后 σ^0进行反演，并采用多解方案结合二维变分法进行风向去模糊处理. 在剔除降雨数据时，针对 HY-2 SCAT VV 极化和 HH 极化均能观测到的 WVC，选取距离 HY-2 SCAT 17.7km 且观测时间间隔相对 HY-2 SCAT 小于 0.5 小时的浮标观测数据进行匹配，共得到 HY-2 SCAT、ECMWF 和浮标完全匹配的 3112 个观测数据. 采用 FR 和 LR 方法分别对匹配数据在风速-风向域和风场 *U-V* 分量域进行验证. 由于 FR 方法考虑了 HY-2 SCAT、ECMWF 和浮标观测数据空间及时间分辨率不同等误差因素，采用 FR 方法相对 LR 更接近匹配数据分布. 由于风场 *U-V* 分量分布近似对称高斯分布，而风速-风向域分布中，风向误差受限于风速大小，风速越小，风向误差越大，因此对比发现在风场 *U-V* 分量进行验证更能反演 HY-2 SCAT 风场精度. 对比发现，浮标、HY-2 SCAT 以及 ECMWF 风场数据中的随机误差与其空间分辨率紧密相关，当统一到 25km 空间分辨率进行统计时，由于浮标本身测量的空间分辨率最小，因此其随机误差最大；对比三者风场数据的标准差和 FR 得到的定标直线可知，三者风场数据保持了一致性，表明 HY-2 SCAT 经 NOC 之后的风场与浮标观测数据和 ECMWF 预报数据相吻合，验证了 HY-2 SCAT 海洋定标的有效性.

感谢国家卫星海洋应用中心提供的 HY-2 微波散射计数据以及 ECMWF 提供的浮标和预报风场数据.

参考文献

[1] Jiang X W, Lin M S, Liu J Q, et al. The HY-2 satellite and its preliminary assessment [J]. International Journal of Digital Earth, 2012, 5(3): 266 - 281.

[2] Long D G, Skouson G B. Calibration of spaceborne scatterometers using tropical rain forests [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 413 - 424.

[3] Wilson J J W, Anderson C, Baker M A, et al. Radiometric cali-

bration of the advanced wind scatterometer radar ASCAT carried onboard the METOP-A Satellite[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2010,48(8):3236 – 3255.

[4] Stoffelen A. A simple method for calibration of a scatterometer over the ocean[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,1999,16(2):275 – 282.

[5] Ebuchi N,Graber H C,Caruso M J. Evaluation of wind vectors observed by Quik SCAT/SeaWinds using ocean buoy data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19 (12):2049 – 2062.

[6] Bourassa M A,Legler D M,O'brien J J,et al. Sea Winds validation with research vessels[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans,2003,108(C2):3019 – 1 – 16.

[7] Satheesan K, Sarkar A, Parekh A, et al. Comparison of wind data from Quik SCAT and buoys in the Indian Ocean[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(10): 2375 – 2382.

[8] Verspeek J,Stoffelen A,Portabella M,et al. Validation and calibration of ASCAT using CMOD5. n[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2010,48(1):386 – 395.

[9] Bentamy A, Croize-Fillon D, Perigaud C. Characterization of ASCAT measurements based on buoy and QuikSCAT wind vector observations[J]. Ocean Science,2008,4(4):265 – 274.

[10] Mathew T,Chakraborty A, Sarkar A, et al. Comparison of oceanic winds measured by space-borne scatterometers and altimeters[J]. Remote Sensing Letters,2012,3(8):715 – 720.

[11] Wang H,Zhu J H,Lin M S,et al. First six months quality assessment of HY-2A SCAT wind products using in situ measurements[J]. Acta Oceanologica Sinica,2013,32(11):27 – 33.

[12] Stoffelen A. Toward the true near-surface wind speed: Error modeling and calibration using triple collocation[J]. Journal of Geophysical Research – Oceans, 1998, 103(C4): 7755 – 7766.

[13] Caires S,Sterl A. Validation of ocean wind and wave data using triple collocation[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans,2003,108(C3):3098 – 1 – 16.

[14] Chakraborty A, Kumar R, Stoffelen A. Validation of ocean surface winds from the OCEANSAT-2 scatterometer using triple collocation[J]. Remote Sensing Letters,2013,4(1):85 – 94.

[15] Verspeek J, Stoffelen A, Verhoef A, et al. Improved ASCAT wind retrieval using NWP ocean calibration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2012,50(7):2488 – 2494.

[16] Vogelzang J,Stoffelen A, Verhoef A, et al. On the quality of high-resolution scatterometer winds[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans,2011,116(C10033):1 – 14.

[17] Liu W T, Katsaros K B, Businger J A. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water-vapor including the molecular constraints at the interface[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,1979,36(9):1722 – 1735.

作者简介



朱金台(通信作者) 男,工学博士,航天东方红卫星有限公司工程师,主要从事星载微波散射计在轨定标方法和技术研究、星载微波遥感载荷系统研究.

E-mail:zhujintai@163.com



董晓龙 男,工学博士,中国科学院空间科学与应用研究中心研究员、博士生导师,主要研究方向:微波(包括毫米波、亚毫米波)遥感成像与探测的理论与方法研究,先进星载、机载和地基主、被动微波遥感器研制及目标与环境的电磁散射与辐射特征以及微波遥感应用研究等.

E-mail:dongxiaolong@mirslab.cn